

## **КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ОБРАБОТАННЫХ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ**

ЯКУПОВ Н.М., *д-р техн. наук, профессор*

ГИНИЯТУЛЛИН Р.Р., *аспирант*

*Учреждение Российской академии наук Институт механики и машиностроения Казанского научного центра РАН, Казань*

*Защита от коррозионного разрушения элементов конструкций и сооружений, является одной из важнейших задач современности. Одним из перспективных направлений повышения коррозионной стойкости является модификация поверхностного слоя элемента конструкции. В работе приводятся некоторые результаты экспериментального исследования коррозионного износа элементов конструкций, на поверхность которых были имплантированы ионы углерода. Для анализа результатов используется экспериментально-теоретический подход.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** тонкостенные элементы, ионная имплантация, коррозионный износ, экспериментальные исследования, пассивирующий слой.

**О коррозионном износе.** Коррозионный износ существенно снижает ресурс оборудования и сооружений, приводя их к техногенным и экологическим авариям и катастрофам. Поэтому разработка способов и методов защиты от коррозионного разрушения элементов конструкций и сооружений, является актуальной задачей.

Согласно электрохимической теории коррозионного износа на поверхности металла, находящегося в агрессивной среде, образуется тонкая защитная пленка – пассивирующий слой [1-3]. При достижении определенного потенциала  $\varphi$  пассивирующий слой разрушается и начинается коррозионное разрушение [1-6] (рис.1).

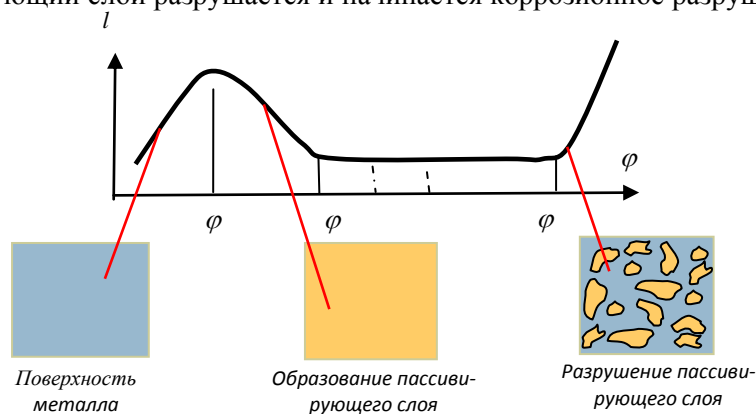


Рис. 1. Зависимость скорости анодного растворения металла  $i$  от потенциала  $\varphi$

На площадках поверхности элемента конструкции с повышенной активностью генерируется большая плотность тока. На этих участках структура пассивирующего слоя ослаблена в большей мере, т.е. при меньшем значении потенциала  $\varphi$ , достигается предельное значение дефектности. Все это способствует ускорению коррозионного процесса. Наиболее активные площадки становятся местами зарождения питтингов. Энергетическая неоднородность поверхности способствует локальной коррозии металлов.

Для борьбы с коррозионным износом разработаны и активно продолжают разрабатывать различные подходы и способы, в частности, легирование конструкционного материала, использование ингибиторов, применение лакокрасочных материалов и т.д. Одним из перспективных направлений борьбы с коррозией – модификация только поверхностного слоя элемента конструкции, которая способствовала бы сохранению пассивирующего слоя при значительных потенциалах, возникающих в области контакта элемента конструкции со средой.

**Об ионной имплантации.** В 70-80-тые годы прошлого столетия наряду с традиционными методами воздействия на металлические материалы появилась возможность проводить поверхностную обработку концентрированными потоками энергии (от  $10^3$  до  $10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) [7-10]. К последним относятся электронные и ионные пучки (ионная имплантация), лазерное излучение и потоки плазмы.

Ионная имплантация (ионная бомбардировка, ионное внедрение, ионное легирование) – метод, основанный на внедрении в твердое тело ускоренных в электростатическом поле ионизированных атомов или молекул с энергией от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

С помощью интенсивных пучков заряженных частиц можно модифицировать уже имеющиеся свойства, а также можно создавать некоторые новые уникальные свойства.

Ионная имплантация находит применение в различных областях, в том числе в металлургии для облучения конструкционных материалов и готовых деталей потоками ионов, приводящее к увеличению их износостойкости, динамической прочности, твердости, и т.д..

Метод ионной имплантации – современная технология, позволяющая контролировать количество введенных атомов; создавать резкие границы и тонкие пассивирующие слои (например, нитриды, оксиды и т.п.).

Под пассивацией обычно понимается перевод поверхности материала в неактивное, пассивное состояние, связанное с образованием тонких поверхностных слоёв соединений, препятствующих коррозии. Среди недостатков метода ионной имплантации можно отметить ее относительную дороговизну.

Эксперименты по имплантации ионов в металлы были начаты относительно поздно. Толчком к началу интенсивных исследований ионной имплантации в металлах были, по-видимому, первые результаты пассивирования урана с помощью бомбардировки ионами аргона, полученные Триллатом и Хайманном [11], и эксперименты Краудера и Тана[12] по пассивации меди с помощью имплантации ионов бора. Причиной интенсификации этих исследований был, главным образом, интерес к материалам для термоядерных реакторов, особенно к их поведению в условиях экстремально сильного облучения, а также к изготовлению коррозионноустойчивых слоев металлов с пассивированной поверхностью.

Естественным методом повышения коррозионной стойкости поверхности металла является имплантация ионов, которые в качестве легирующих добавок могут предотвратить или снизить развитие коррозии металла, например, ионов никеля или хрома в стали. Коррозия представляет собой сложный процесс, который зависит не только от поведения компонентов металла и окислителя в электрохимическом отношении, но и от границ зерен, диффузии по границам зерен, механического напряжения, температуры и окружающей атмосферы. В связи с этим важным аспектом применения имплантации является возможность методического исследования механизмов коррозии, так как метод ионной имплантации позволяет внедрить в металл дозированное количество ионов практически любых элементов без изменения границ его зерен.

Согласно [13] наблюдалось повышение микротвердости стали при имплантации ионов азота, аргона, бора и углерода. На рис. 2 в качестве примера показано повышение микротвердости и коэффициента трения стали после бомбардировки ионами аргона. Микротвердость при больших дозах возрастает более чем в 2-3 раза.

При имплантации ионов азота микротвердость стали возрастает как за счет влияния радиационных дефектов, так и вследствие образования нитридов [14]. Например, путем бомбардировки ионами азота дозой  $10^{17}$  см<sup>-2</sup> твердость стали по Виккерсу может быть увеличена с 300 до 400 кг. Ионы бора также хорошо подходят для повышения микротвердости и износостойкости железа [15].

После имплантации уменьшается истирание поверхности материала, часто до 30 раз [16]. Этот эффект особенно отчетливо выражен для тяжелых ионов.

Возможность инициирования при ионном облучении существенно различающихся радиационных процессов позволяет управлять сорбционными, три-

биологическими, оптическими и электропроводящими свойствами поверхности. Эффективность поверхностной модификации эксплуатационных свойств металлических материалов проявляется в изменении их поверхностных свойств. Важным аспектом применения имплантации является возможность методического исследования различных физических процессов, в том числе механизмов коррозии.

**Цель и подход исследования.** Целью работы является исследование влияния на коррозионную стойкость тонкостенных элементов, поверхность которых модифицирована атомами углерода ионно-импульсной имплантацией.

Для исследования степени коррозионного износа образцов, выдержанных заданное время в агрессивной среде, используется экспериментально-теоретический метод [17-20].

На экспериментальном этапе из исследуемого тонкостенного элемента, подвергнутого или не подвергнутого ионной имплантации и выдержанные в коррозионной среде, вырезались круглые образцы, которые закреплялись по контуру на установке, схема которой представлена на рис.3. Образцы нагружались равномерным давлением  $p$ . В процессе увеличения давления  $p$  производится мониторинг за формой образуемого образцом купола, в частности, снимаются данные для графика «давление  $p$  – прогиб  $H$ ».

Экспериментальные зависимости «давление  $p$  – прогиб  $H$ » характеризуют степень коррозионного износа того или иного образца. При необходимости на теоретическом этапе [17-20] можно построить кривые деформирования, в частности «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций», оценить изменение модуля упругости (при упругих деформациях) или условного модуля упругости (при пластических деформациях), используя соотношения, полученные из нелинейной теории оболочек.

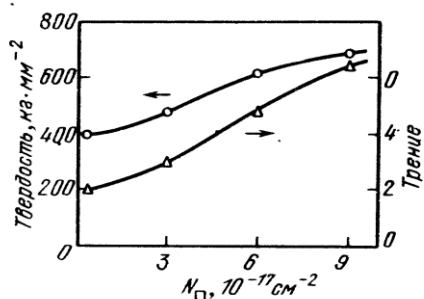


Рис. 2. Изменение микротвердости и трения как функция дозы при имплантации в сталь ионов  $\text{Ag}$  с энергией 40 кэВ

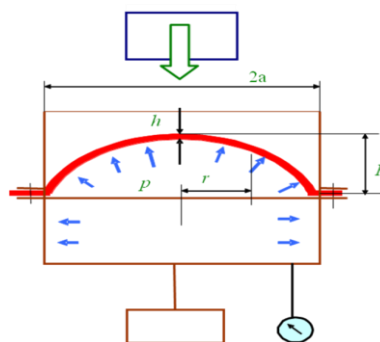


Рис.3. Схема установки

**Пример.** Были проведены испытания трех пар металлических образцов из листовой стали толщиной  $t = 0.5$  мм, поверхности которых были подвергнуты импульсной ионной имплантации (имплантировались атомы углерод, число импульсов равно 8). Далее образцы помещались и выдерживались в агрессивной среде – 2 суток (образец №12), – 3 суток (образец №10), – 4 суток (образец №9). На рис.4 представлены образцы из партии №12 без и с имплантацией после коррозионного износа, а на рис.4 кривые деформирования «прогиб - давление» для образца №12 и образца без имплантирования. На рис. 5, 6 представлены кривые деформирования «прогиб - давление» для образца № 12, № 10 и № 9.

Как видно из рис.5, эффект имплантирования очевиден. При этом, с увеличением продолжительности выдерживания в агрессивной среде (рис.6) степень коррозионного износа увеличивается.



Рис. 4. Образцы из партии №12 без имплантации (слева) и с имплантацией

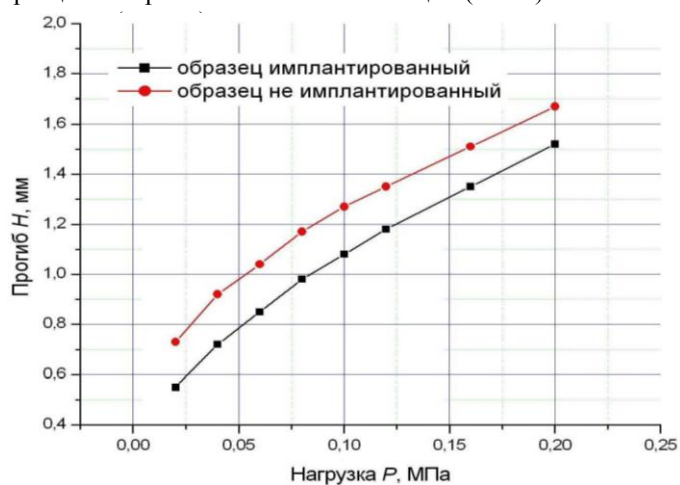


Рис.5. Зависимость «Прогиб - давление» для партии образца №12

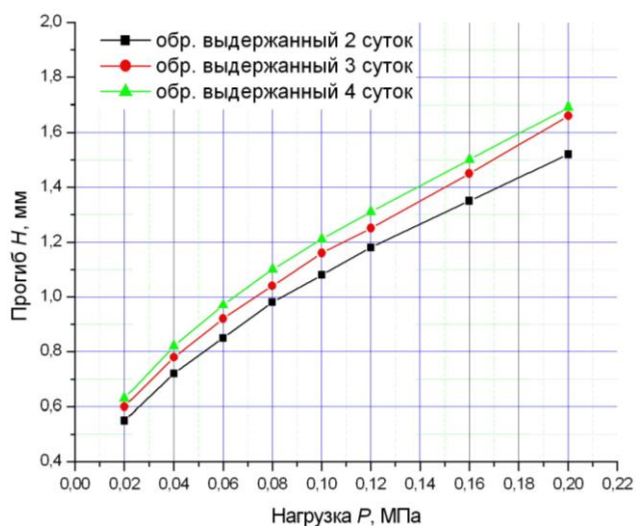


Рис. 6. Зависимость «Прогиб - давление» для партии образца №12, №10, №9

#### Л и т е р а т у р а

1. *Frumkin A.N.* Z. Phys.chem., 1932. В.44. №7. S.116
2. *Колотыркин Я.М., Фрумкин А.Н.* // Докл. АН, 1941. Т.33. №7-8. С.446-451.
3. *Колотыркин Я.М., Бунэ Н.Г.* // ЖФХ. 1961. Т.35. С.1543.
4. *Сидоренко С.Н., Якупов Н.М.* Коррозия – союзник аварий и катастроф. Монография. М.: Изд-во РУДН, 2002. – 93 с.
5. *Низамов Х.Н., Сидоренко С.Н., Якупов Н.М.* Прогнозирование и предупреждение коррозионного разрушения конструкций. – М.: Изд-во РУДН, 2006. – 355 с.
6. *Якупов Н.М.* Лаборатория нелинейной механики оболочек: история и разработки последних лет. – Казань: ИММ КазНЦ РАН. 2006. – 98 с.
7. *Анисимов С.И., Имас Э.А., Романов Г.С.* и др. Действие излучений большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
8. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
9. Application of particle and laser beams in materials technology/ Ed. by P. Misaelides. Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishes. 1994. –678 p.
10. Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы / Под ред. Н.Н. Рыкалина. – М.: Наука, 1985.
11. *Trillat J. J.* In: Le bombardement ionique. Theories et applications. Paris. 1961
12. *Crowder B. L., Tan S. I.*: IBM Technical Disclosure Bulletin 14 (1971). P.198.
13. *Pavlov A. V., Pavlov P. V., Zorin E. I., Tetel'baum, D.* 1. Proc. All Soviet Meeting on Ion Beam Physics. Kiev, 1974.
14. *Gabovich M.D., Budernaya L.D., Poritskii V.Y., Protsenko I.M.* All Soviet Meeting on Ion Beam Physics. Kiev, 1974.
15. *Takagi T., Yamada I., Kimura H.* Ion Implantation in Semiconductors. Ed. Namba S. New York. 1970.
16. *Hartley N. E. W.* Application of Ion Beams to Materials 1975. Eds. Carter G., Colligon J.S., Grant W. AJ. Inst. of Phys. Conf. Ser. 28. 1976.
17. *Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Способ определения прочностных свойств тонкослойных материалов. – Патент на изобретение РФ № 2310184.
18. *Якупов Н.М., Галимов Н.К., А.А. Леонтьев А.А.* Экспериментально- теоретический метод исследования прочности полимерных пленок // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2000. –Т.6, № 2. – С.238-243.
19. *Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Состояние конструкций градиен и предотвращение их разрушения// Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2006. – №7-8. – С. 36-42.
20. *Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н.* Методика испытания пленок и мембран в условиях равномерного распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. Т.74. №11. – С. 54-56.

#### **CORROSION DETERIORATION OF THE THIN-WALLED ELEMENTS PROCESSED BY A METHOD OF IONIC IMPLANTATION**

Yakupov N.M., Giniyatullin R.R.

Protection against corrosion destruction of elements of designs and constructions, is one of the major problems of the present. One of perspective directions of increase of corrosion firmness is updating of a blanket of an element of a design. In work some results of an experimental research of corrosion deterioration of elements of designs on which surface carbon ions have been implanted are resulted. For the analysis of results the experimentally-theoretical approach is used.

**KEYWORDS:** thin-walled elements, ionic implantation, corrosion deterioration, experimental researches, a passivity layer.